

1961–2005 年西藏飞蝗潜在分布的变化

封传红^{1,2,*}, 单绪南³, 郭 聪¹, 罗林明²

(1. 四川大学生命科学学院, 成都 610064; 2. 四川省农业厅植物保护站, 成都 610041; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要: 青藏高原是气候变暖的敏感地区, 温度是影响青藏高原昆虫分布的重要因素。作为青藏高原的本地物种的蝗虫, 西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* Chen 对高原升温的反应就是获得的有效积温增加, 分布范围扩大。为了准确估计西藏飞蝗发生面积, 以期对西藏飞蝗监测、预警及控制提供依据, 本研究以 1961–2005 年 90 个高原气象站地面温度资料计算了西藏飞蝗的有效积温 (accumulated degree-days, ADD), 建立了 1961–2005 年有效积温与地理位置的模型; 并根据这些模型利用 GIS 技术, 计算了各年西藏飞蝗的潜在分布面积 (area of potential distribution, APD)。结果表明: 温度升高能明显增加西藏飞蝗获得的有效积温, 西藏飞蝗的分布主要沿高原河谷分布。1961–2005 年, 西藏飞蝗平均潜在分布面积为 91 081 km², 约占高原面积 3%; 次热年 1998 年西藏飞蝗的潜在分布面积最大, 达 142 988 km², 是最冷年 1968 年的 1.9 倍。相关分析表明: 西藏飞蝗潜在发生面积与年平均地面温度显著相关。趋势线分析表明: 45 年间青藏高原每年平均增温 0.0301℃, 而西藏飞蝗潜在发生面积平均每年增加 504.38 km², 两者之比为 16 756.8, 温度的增加能够引起西藏飞蝗潜在分布面积大幅上升。本文为全球气候变暖对青藏高原生态的影响提供了事例依据。

关键词: 西藏飞蝗; 青藏高原; 潜在分布; 气候变暖; 有效积温

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2011)06-0694-07

The change of potential distribution of *Locusta migratoria tibetensis* Chen (Orthoptera: Acrididae) from 1961 to 2005

FENG Chuan-Hong^{1,2,*}, SHAN Xu-Nan³, GUO Cong¹, LUO Lin-Ming² (1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Plant Protection Station of Sichuan, Chengdu 610041, China; 3. The National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: Temperature is one of important environmental factors affecting on insects in the Tibetan Plateau, a region sensitive and vulnerable to climate warming, for the cold plateau climate. As an endemic species, *Locusta migratoria tibetensis* Chen may respond to warming climate on the plateau by increase of the accumulated degree-days (ADD) from habitat and expansion of its distribution. In order to depict the relationship between temperature changes and the ADD of the locust and to predict the distribution and occurrence of the locust in this region under the conditions of climate warming, we used surface temperature data from 90 weather stations on the Tibetan Plateau during the period of 1961–2005 to calculate the ADD of the locust and the annual area of potential distribution (APD) in ArcGIS according to the linear regression models of the ADD to geographical position. The results suggested that climate warming could increase the locust achievable ADD and APD to a great extent. The raster ADD maps indicated that in most cases the locust was distributed along the valley of main rivers over the plateau, and the potential distribution area of the locust was about 91 081 km² (3% of the Tibetan Plateau area). The largest APD occurred in 1998, the second hottest year, was 142 988 km², which was 1.9 times the APD in 1968, the coldest year. There was a significant correlation between the APD and the annual surface temperature. The annual surface temperature increased at the speed of 0.0301℃ per year, while the APD increased at the speed of 504.38 km² per year. The ratio of the increasing speed of APD to that of temperature was 16 756.8, indicating that a little increment in temperature would bring a great extension in distribution of *L. migratoria tibetensis*. This study presents an example of influence of global warming on plateau ecology.

基金项目: 农业部西藏飞蝗发生规律与监测预警资助项目

作者简介: 封传红, 男, 1973 年 5 月生, 湖南衡南人, 博士, 高级农艺师, 主要从事昆虫生态研究和植物保护工作

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fengchuanhong8@163.com

收稿日期 Received: 2010-11-07; 接受日期 Accepted: 2011-05-04

Key words: *Locusta migratoria tibetensis*; Tibetan Plateau; potential distribution; climate warming; accumulated degree-days (ADD)

西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* Chen 是世界分布最高的飞蝗, 20 世纪 90 年代以来, 西藏飞蝗发生呈现上升趋势 (Chen and Zhang, 1999), 特别是 2003 – 2006 年在沿金沙江、雅鲁藏布江和雅砻江等河谷地带, 西藏飞蝗密度高达 1 000 ~ 3 000 头/m², 严重威胁着青稞和牧草的生产安全。作为青藏高原的本地物种, 经过漫长的进化, 西藏飞蝗已经适应了青藏高原的气候、地形和植被等。蝗虫是反映环境变化的指示种 (陈永林, 2001), 与飞蝗种的 2 个亚种东亚飞蝗 *L. migratoria manilensis* (Meyen) 和亚洲飞蝗 *L. migratoria migratoria* (Linnaeus) 相比, 西藏飞蝗的体形小, 而且体形随着海拔增加而逐渐减少, 这可能是西藏飞蝗对青藏高原气候和植被等环境因子的反应 (陈永林, 1963)。由于青藏高原气候寒冷, 温度是影响西藏飞蝗分布与发生众多的环境因子中的一个重要因素。一些研究表明, 青藏高原是全球气候变暖的敏感地区, 气温升高是近 30 ~ 50 年来青藏高原气候的变化特征之一, 而且其增温速率高于同纬度地区 (刘晓东和侯萍, 1998; 周宁芳等, 2005; 吴绍洪等, 2005)。

温度的升高影响动植物的发生分布。在西班牙中部山区的高海拔地区, 气候变暖导致高山草甸被低海拔的灌木所替代 (Sanz-Elorza *et al.*, 2003)。在青藏高原 5 – 7 月的植被总量呈现出长期的上升趋势 (Xu and Liu, 2007), 昆虫对环境变化的反应要比其他用来指示环境物种如植物和鸟类更为强烈

(Menéndez, 2007)。昆虫适合度模型分析表明, 由于昆虫对温度的耐受性较广, 在高纬度地区全球变暖能够提高昆虫的适应性 (Deutsch *et al.*, 2008)。日本 50 年的灯诱资料表明, 冬季温度升高将导致稻田二化螟 *Chilo suppressalis* 和黑尾叶蝉 *Nephotettix cincticeps* 的数量快速增加 (Yamamura *et al.*, 2006)。青藏高原气温上升对西藏飞蝗的频繁暴发造成影响也是明显的。

温度的升高将明显提高昆虫从环境获得的有效积温, 尽管平均温度变化的幅度一般在 1℃/a 以内, 有效积温会逐日累加较少的变量, 从而引起生物发生较大的变化。在北极地区, 年平均温度升高 1℃, 可以使当地的 1 种线虫 *Umingmakstrongylus pallikuukensis* 由 2 年完成一个世代变成 1 年完成一个世代 (Kutz *et al.*, 2005)。另一方面, 气候变暖会增加动植物获得的有效积温, 从而扩大动植物的发生范围。由于青藏高原恶劣的自然环境, 很难通过人为调查来确定西藏飞蝗分布, 对防控工作造成了巨大的困难。有效积温也被广泛地用于分析动植物潜在的分布 (Hill *et al.*, 1999; Hartley and Lester, 2003)。为了分析西藏飞蝗潜在分布范围, 作者等通过实验测定了西藏飞蝗发育起点温度、过冷却点和世代发育温度 (王思忠等, 2007; 封传红等, 2008; 李庆等, 2008) (表 1)。本研究利用这些参数, 结合青藏高原气候资料和地形分析, 探讨温度变化下西藏飞蝗的潜在分布。

表 1 西藏飞蝗发育参数
Table 1 Parameters of development for *Locusta migratoria tibetensis*

	过冷却点 (℃) Super cooling point	发育起点温度 (℃) Lower developmental threshold	发育上限温度 (℃) Upper developmental threshold	有效积温 (℃) Accumulated degree-days
卵 Egg	-22.0	14.2	40	179.1
1 龄若虫 1st instar nymph	-9.3	15.8	40	67.5
2 龄若虫 2nd instar	-8.5	16.6	40	61.1
3 龄若虫 3rd instar	-7.2	16.8	40	62.1
4 龄若虫 4th instar	-6.5	16.4	40	71.2
5 龄若虫 5th instar	-8.1	15.0	40	99.2
世代 Generation		14.2	40	787.8

1 材料和方法

1.1 资料来源

1961 – 2005 年逐日地面气温资料由中国气象

局提供, 从中国 730 个气象站点中选出青藏高原附近 90 个气象站点用来作为计算西藏飞蝗有效积温的分布。数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 资料来源于美国地质调查局网站 (<http://>

edc.usgs.gov/), 中国 30 弧度分辨率(约 1 000 m) DEM, 下载了包括青藏高原的 E060N40. tar. gz 和 E100N40. tar. gz (U. S. Geological Survey, 2000)。省级矢量地图来自国家基础地理信息中心(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)。

1.2 有效积温模型

t0 至 t1 有效积温采用积分函数(1) (Lischke *et al.*, 1997)。

$$M(t,t_0)=\int_{t_0}^t dep(\tau)d\tau$$

(1)

式(1)中函数 dep(τ)为日温度变化函数, 假设日气温的变化为正弦函数, 即从日最低温度到最高温度, 从最高温度到最低温度都符合正弦曲线。根据发育起点温度、发育上限温度与日最高温度、最低温度的数量关系, 存在 6 种情况, 利用公式(1)可以推导出积温计算公式(Zalom *et al.*, 1983)。

1.3 积温数据栅格化

从各个气象站点计算的数据只能代表气象站点附近的值, 在远离气象站的地点, 通常用插值的办法计算积温值, 然而在青藏高原由于地表起伏较大, 温度在水平方向变化极大, 常规插值方法不适合(李新等, 2003)。研究表明积温与经度、纬度和海拔有明显的线性关系(廖顺宝和李泽辉, 2004)。本文建立有效积温与地理位置的线性方程(2):

$$Y=a_0+a_1*x+a_2*y+a_3*z$$

(2)

式(2)中, a0, a1, a2, a3 为常数, 如式(2)小于 0, 则定 Y=0。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Virtual Foxpro (version:6.0) 建立气象数据库, 进行相关计算, 利用 Matlab (version

R2007, the Mathworks Inc., USA) 建立有效积温和地理位置的多元线性模型、进行趋势线分析。利用 ARCGIS9.2 software (version 9.0, ESRI Inc., USA) 拼合裁剪青藏高原 DEM 数据, 再基于 DEM 数据衍生得到经度分布栅格数据和纬度分布栅格数据。利用 ARCGIS 的 raster calculator 计算得到青藏高原有效积温栅格地图, 统计分析时空变化。

2 结果与分析

2.1 1961–2005 年青藏高原地面温度和西藏飞蝗有效积温分布的变化

对 1961–2005 年青藏高原各站点地面气温年平均值分析表明: 青藏高原按照平均 0.3℃/10a 速度增温, 其中 90 个站点中, 88.9% 的站点地面气温增加, 2% 的站点地面气温呈下降的趋势。对 1961–2005 年青藏高原各站点有效积温平均值分析表明: 青藏高原的西藏飞蝗的有效积温按照平均 11.7 日度/10a 速度增加。有效积温与年平均温度之间相关系数为 0.8046 (P<0.0001)。

2.2 海拔高度对西藏飞蝗分布的影响

按照不同高度范围内将气象站排序、归类, 再以不同高度范围为单位, 累计各高度范围相应气象站有效积温在不同的积温区间出现的次数, 再除以总的次数(90*45), 转换为百分比(表 2), 从表 2 可知, 海拔高度在 3 500 m 以下, 西藏飞蝗可以完成世代发育所需的有效积温, 成虫最高分布为西藏泽当(91.46°E, 29.15°N, 海拔 3 551.7 m)。

表 2 1961–2005 年不同有效积温在垂直高度上的百分比

Table 2 The percentage of accumulated day-degrees (ADD) of weather stations at different elevations

积温(日度) Degree-days (DD)	海拔 Elevation (m)					
	1 500–2 000	2 000–2 500	2 500–3 000	3 000–3 500	3 500–4 000	>4 000
卵 Eggs (ADD<179.1)	0.0	0.0	2.4	13.4	10.5	22.1
卵到若虫 Egg to nymph (ADD≥179.1)	1.6	1.6	14.6	9.7	7.2	2.1
卵到成虫 Egg to adult (ADD≥540.2)	3.5	2.5	2.1	0.8	0.1	0.0
世代 Generation (ADD≥787.8)	2.5	1.9	1.2	0.2	0.0	0.0

2.3 有效积温的水平变化

1961 - 2005 年各站点的有效积温趋势线(图 1)表明, 82.2% 站点趋势线斜率为正值, 即呈增加趋势。趋势线显著性测定表明: 67.6% 的有效积温增加, 站点置信度达 90%, 60.8% 的增加, 站点置

信度达 95%; 只有 25% 有效积温减少, 站点置信度达 90%。西藏飞蝗的有效积温增加较快的区域位于雅鲁藏布江流域和北纬 35° 以北的青海省, 在金沙江以东的一些站点, 有效积温呈现减少的趋势。

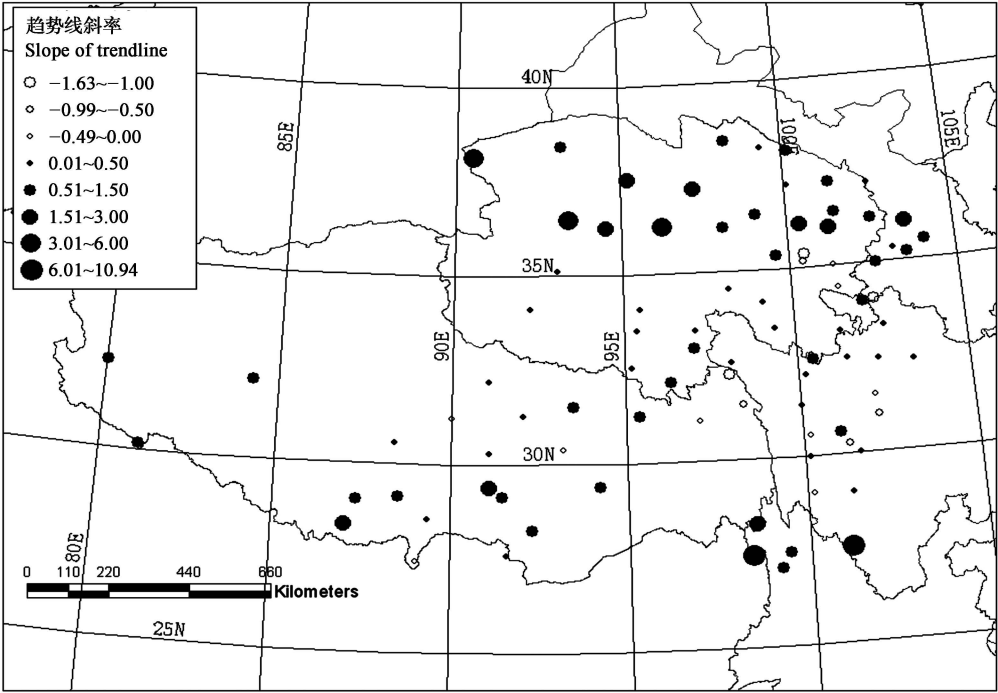


图 1 1961 - 2005 年西藏飞蝗有效积温的变化率

Fig. 1 The station slope of ADD trendline of *Locusta migratoria tibetensis* from 1961 to 2005

图中圆点表示气象站 Each dot represents a weather station. ADD: 有效积温 Accumulated day-degrees. 下同 The same below.

2.4 西藏飞蝗的潜在分布模型

建立 1961 - 2005 年各年有效积温与地理位置关系式(表 3), 将式 2 中 a_0, a_1, a_2, a_3 作 1961 - 2005 年时间序列图, 系数 a_0 与年平均地面温度变化相似, 两者相关系数为 0.8169, a_0 可以视为热量输入因子。

将 1961 - 2005 年有效积温作平均值, 建立有效积温模型(3):

$$Y = 3843.6002 - 14.5725x - 27.8969y - 0.3688z \quad (3)$$

式(3)的 $R^2 = 0.8009$ 。

2.5 西藏飞蝗发生区域的年变化

2.5.1 西藏飞蝗常年分布: 根据式 3 得到常年青藏高原任意地理位置 Y 值, 本文将 Y 值分为 5 个区间: (1) 0, 蝗虫不能存活; (2) 区间(0, 179.1), 卵能发育, 但不能孵化; (3) 区间(179.1, 540.2), 蝗蛹阶段; (4) (540.2, 787.8) 成虫发育; (5) >

787.8, 1 代以上区间。以此为图例在地理信息系统中生成有效积温栅格地图(图 2)。区间 1 ~ 5 的面积分别为 2 071 936 km², 448 034 km², 377 849 km², 32 063 km² 和 59 018 km²。其中区间 4 和 5 为潜在分布区, 只占高原面积的 3%。从图 2 中可以看出西藏飞蝗主要分布在沿雅鲁藏布江、金沙江和雅砻江等河谷区域。

2.5.2 西藏飞蝗分布面积的年度变化: 次热年 1998 年西藏飞蝗的潜在分布面积最大, 达 142 988 km², 是最冷年 1968 年的 1.9 倍。从 1998 年有效积温分布图来看, 在青海省的西部出现了大片潜在分布区域。1961 - 2005 年地面年平均温度和西藏飞蝗潜在发生面积的相关分析表明二者显著相关 ($R = 0.7383, P < 0.0001$)。发生趋势线分析表明: 45 年间青藏高原每年平均增温 0.0301℃, 而西藏飞蝗潜在发生面积平均每年增加 504.38 km² (图 3)。

表 3 1961–2005 年西藏飞蝗有效积温与地理位置模型

Table 3 Models of ADD to geographic position of *Locusta migratoria tibetensis* from 1961 to 2005

年份 Year	系数 Coefficients				决定系数 R^2
	常数 Constant	经度 Longitude	纬度 Latitude	高度 Elevation	
1961	3 513.6138	-13.1187	-23.4949	-0.3493	0.7442
1962	3 118.6877	-12.9130	-16.6024	-0.3205	0.7608
1963	3 767.6746	-14.0883	-26.0757	-0.3781	0.8097
1964	3 880.0108	-12.8408	-35.2828	-0.3599	0.7553
1965	3 787.0410	-16.8892	-22.8629	-0.3481	0.7994
1966	3 651.4769	-13.9144	-25.6976	-0.3537	0.7818
1967	3 649.4644	-11.6525	-34.5301	-0.3357	0.7675
1968	3 380.5360	-13.1418	-24.0610	-0.3241	0.7742
1969	3 974.8611	-14.4659	-29.8488	-0.3889	0.8056
1970	3 779.8944	-14.5715	-27.9804	-0.3506	0.8100
1971	3 840.2907	-13.0814	-31.1963	-0.3753	0.7753
1972	4 002.6385	-15.8235	-27.6161	-0.3748	0.7905
1973	3 873.2691	-13.5036	-31.9037	-0.3690	0.7731
1974	3 835.0134	-15.4104	-25.8382	-0.3688	0.7903
1975	3 699.7645	-11.8778	-32.8138	-0.3570	0.7548
1976	3 475.1894	-11.4771	-32.0794	-0.3225	0.7665
1977	3 274.6465	-11.4445	-23.9536	-0.3360	0.7975
1978	3 655.9651	-15.0131	-21.5359	-0.3640	0.7954
1979	3 815.4646	-12.6150	-34.7205	-0.3539	0.7684
1980	3 722.3473	-14.4205	-25.8506	-0.3640	0.7929
1981	4 046.7629	-15.2846	-29.2767	-0.3880	0.7680
1982	3 912.8887	-15.4060	-29.6370	-0.3545	0.7973
1983	3 934.2502	-11.8398	-40.6962	-0.3520	0.7666
1984	3 813.7861	-13.3583	-32.9121	-0.3511	0.7634
1985	3 664.6684	-14.3222	-26.1600	-0.3452	0.7849
1986	3 756.9697	-14.1646	-29.1160	-0.3467	0.7668
1987	3 876.2636	-14.7518	-28.7891	-0.3663	0.7965
1988	3 822.4750	-14.3039	-27.9243	-0.3673	0.7966
1989	3 724.4483	-14.4402	-27.1302	-0.3473	0.7737
1990	3 855.9841	-16.9396	-21.9707	-0.3671	0.8231
1991	3 822.2778	-15.3988	-21.8433	-0.3914	0.8167
1992	3 603.8414	-12.1694	-30.9476	-0.3419	0.7702
1993	3 959.0882	-15.4399	-30.6868	-0.3568	0.7897
1994	4 356.5500	-16.1864	-33.8768	-0.4029	0.7916
1995	4 129.1065	-15.7725	-31.5253	-0.3742	0.7843
1996	3 935.2542	-15.2815	-27.5490	-0.3761	0.7910
1997	3 660.3780	-14.8399	-20.6496	-0.3767	0.8182
1998	4 610.2679	-18.1817	-31.4593	-0.4393	0.8230
1999	4 652.4944	-18.3301	-32.7713	-0.4384	0.8034
2000	3 902.8516	-16.5006	-18.9917	-0.4092	0.8295
2001	4 220.0754	-18.0229	-23.8581	-0.4121	0.8122
2002	4 019.0823	-15.7658	-24.1280	-0.4120	0.8111
2003	4 135.6774	-14.8902	-31.6598	-0.4020	0.8088
2004	4 070.7277	-17.1705	-24.9893	-0.3865	0.8040
2005	4 496.7775	-16.5826	-34.8816	-0.4224	0.7884

2.5.3 模型的验证: 作出阿里地区常年(1961–2005 平均)和 2005 年有效积温分布图(图 4), 图 4 表明在常年阿里地区部分地区能够提供西藏飞蝗发育所需温度, 计算西藏飞蝗潜在面积为 198 km², 2005 年西藏飞蝗潜在分布明显扩大, 潜在面积为 841 km², 主要分布在扎达县、普兰县和噶尔县, 与该地区西藏飞蝗发生加重情况吻合。

3 讨论

昆虫对温度的增加非常敏感, 比较 1961–2005 青藏高原温度趋势线与西藏飞蝗潜在发生面积趋势线(图 3), 两者斜率之比为 16 756.8, 说明温度的增加能够引起西藏飞蝗潜在分布面积大幅上升。西藏飞蝗部分 1 代卵可以当年孵化出蝗蝻, 但是 10 月中旬后 3~4 龄蝗蝻会因为天气寒冷而死亡。气候变暖积温增加后, 不完全 2 代可以发育至成虫, 2 代卵加上一代滞育卵将明显增加西藏飞蝗的越冬卵基数, 从而加重当年西藏飞蝗的危害。飞蝗暴发受干旱、温度和降雨等因素的影响(马世骏, 1958), 气候变暖引起适生温度区间频次的增加, 将有利于西藏飞蝗的存活。2003–2006 年的高温提高了该虫存活率, 田间调查表明, 西藏飞蝗以群居型为主, 而飞蝗群居型的出现是反映了蝗群的高密度。金沙江上游附近气象站点表明, 2003–2006 年温度增加了 0.1~1℃, 降雨减少了 10~190 mm。

近年来西藏飞蝗在青藏高原的东南部暴发更为常见, 在青海省只能发现零星的散居型, 但是在气温较高的年份如 1998–2000 年, 青海省西部可以达到西藏飞蝗所需的有效积温。可以预测随着温度的增加, 西藏飞蝗发生区域将向北移动。此外, 西藏飞蝗喜食植物禾本科如克氏针茅 *Stipa krylovii*, 在试验温度升高时, 其竞争能力更强(Niu and Wan, 2008), 温度上升也可能改善西藏飞蝗的食物状况, 气候变暖下高原植被的扩展将扩大西藏飞蝗未来的分布。

在野外调查发现, 西藏飞蝗喜欢在高温小气候区域内活动, 一般在上午 9:00 太阳升起时开始活动, 如遇到阴天, 将推迟活动时间, 直到温度上升到 12~14℃ 以上, 西藏飞蝗在中午时最为活跃, 进行蜕皮、羽化、交配等活动, 到了太阳下山时, 蝗蝻会集中在温度较高的石头上调节体温。雌虫一般把卵产在向阳面的突出土丘。以上的这些行为可以看作是西藏飞蝗对高原低温的一种适应性反应。因此, 西藏飞蝗实际分布应该比本文计算的面积要大一些。

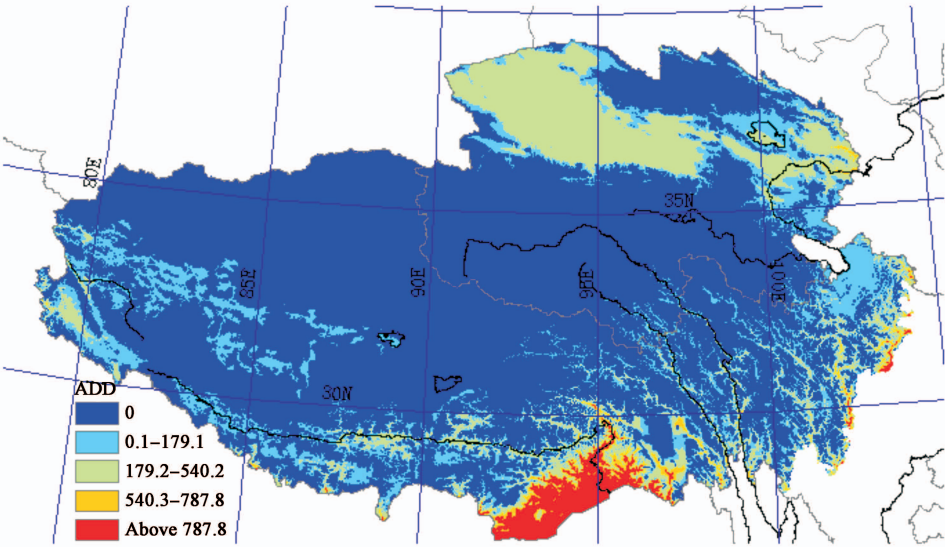


图 2 西藏飞蝗有效积温分布图

Fig. 2 ADD map of *Locusta migratoria tibetensis*

图中红色和橙色为西藏飞蝗潜在分布区 Zone with red or orange means the locust potential distribution. 图 4 同 The same for Fig. 4.

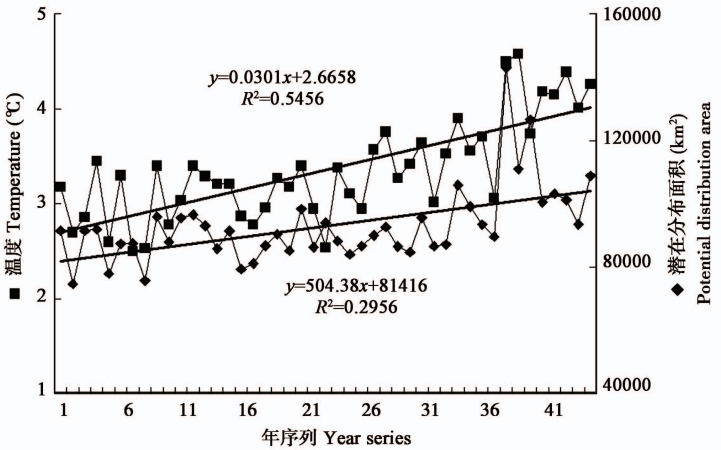


图 3 1961 - 2005 年地表温度与西藏飞蝗潜在分布面积

Fig. 3 The potential distribution area of *Locusta migratoria tibetensis* and surface temperature from 1961 to 2005

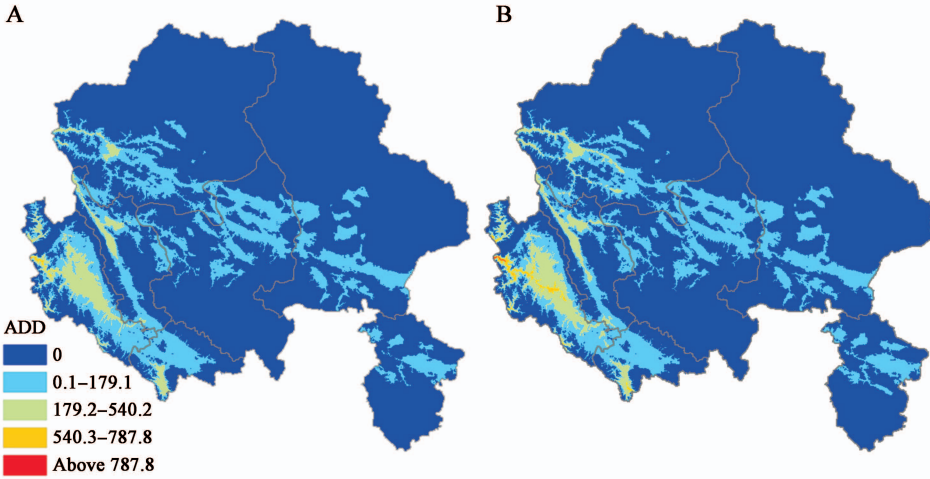


图 4 阿里地区常年(1961 - 2005 平均)(A)和 2005 年(B)西藏飞蝗有效积温分布

Fig. 4 ADD map of *Locusta migratoria tibetensis* in average year (1961 - 2005) (A) and 2005 (B) in Ali, Tibet

参考文献 (References)

- Chen YL, 1963. A new subspecies of *Locusta migratoria* – Tibetan migratory locust (*Locusta migratoria tibetensis* subsp. n.). *Acta Entomol. Sin.*, 12(4): 463–475. [陈永林, 1963. 飞蝗新亚种——西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* subsp. n. 昆虫学报, 12(4): 463–475]
- Chen YL, 2001. Discussion on the ecospecies of acridoids and its significance of indicator. *Acta Ecol. Sin.*, 21(1): 156–158. [陈永林, 2001. 蝗虫生态种及其指示意义的探讨. 生态学报, 21(1): 156–158]
- Chen YL, Zhang DE, 1999. Historical evidence for population dynamics of Tibetan migratory locust and the forecast of its outbreak. *Insect Sci.*, 6: 135–145.
- Deutsch CA, Tewksbury JJ, Huey RB, Sheldon KS, Ghalambor CK, Haak DC, Martin PR, 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105: 6668–6672.
- Feng CH, Wang SZ, Jiang F, Yang G, You C, Li Q, Zhang M, Luo LM, 2008. Influence of temperature on distribution of *Locusta migratoria tibetensis* Chen. *Plant Prot.*, 34(1): 67–71. [封传红, 王思忠, 蒋凡, 杨刚, 游超, 李庆, 张敏, 罗林明, 2008. 温度对四川省甘孜州西藏飞蝗分布的影响. 植物保护, 34(1): 67–71]
- Hartley S, Lester PJ, 2003. Temperature-dependent development of the Argentine ant, *Linepithema humile* (Mayr) (Hymenoptera: Formicidae): a degree-day model with implications for range limits in New Zealand. *N. Z. Entomol.*, 26: 91–100.
- Hill JK, Thomas CD, Huntley B, 1999. Climate and habitat availability determine 20th century changes in a butterfly's range margin. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 266: 1197–1206.
- Kutz SJ, Hoberg EP, Polley L, Jenkins EJ, 2005. Global warming is changing the dynamics of arctic host-parasite systems. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 272: 2571–2576.
- Liao SB, Li ZH, 2004. Study on methodology for rasterizing accumulated temperature data. *Geogr. Res.*, 23(5): 633–640. [廖顺宝, 李泽辉, 2004. 积温数据栅格化方法的实验. 地理研究, 23(5): 633–640]
- Li Q, Wang SZ, Feng CH, Zhang M, Jiang F, Yang G, Luo LM, 2008. The physiological and biochemical indexes of the cold hardiness of *Locusta migratoria tibetensis* Chen. *Acta Ecol. Sin.*, 28(3): 1314–1320. [李庆, 王思忠, 封传红, 张敏, 蒋凡, 杨刚, 罗林明, 2008. 西藏飞蝗 (*Locusta migratoria tibetensis* Chen) 耐寒性理化指标. 生态学报, 28(3): 1314–1320]
- Lischke H, Löffler TJ, Fischlin A, 1997. Calculating temperature dependence over long time periods: a comparison and study of methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86: 169–181.
- Liu XD, Hou P, 1998. Relationship between the climatic warming over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation. *Plat. Meteorol.*, 17(3): 245–249. [刘晓东, 侯萍, 1998. 青藏高原及其邻近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系. 高原气象, 17(3): 245–249]
- Li X, Cheng GD, Lu L, 2003. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang Plateau. *Plat. Meteorol.*, 22(6): 565–573. [李新, 程国栋, 卢玲, 2003. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较. 高原气象, 22(6): 565–573]
- Ma SJ, 1958. The population dynamics of the oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis* Meyen) in China. *Acta Entomol. Sin.*, 8(1): 1–40. [马世骏, 1958. 东亚飞蝗 (*Locusta migratoria manilensis* Meyen) 在中国的发生动态. 昆虫学报, 8(1): 1–40]
- Menéndez R, 2007. How are insects responding to global warming? *Tijdschr. Entomol.*, 150: 355–365.
- Niu SL, Wan SQ, 2008. Warming changes plant competitive hierarchy in a temperate steppe in northern China. *J. Plant Ecol.*, 1: 103–110.
- Sanz-Elorza M, Dana ED, González A, Sobrino E, 2003. Changes in the high-mountain vegetation of the Central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming. *Ann. Bot.*, 92: 273–280.
- U. S. Geological Survey, 2000. GTOTO30 digital terrain model. EROS data center. <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>.
- Wang SZ, Li Q, Feng CH, Zhang M, Jiang F, Yang G, Luo LM, 2007. Cold hardiness of *Locusta migratoria tibetensis* in each developmental stage. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(6): 896–897. [王思忠, 李庆, 封传红, 张敏, 蒋凡, 杨刚, 罗林明, 2007. 西藏飞蝗各发育阶段的耐寒性. 昆虫知识, 44(6): 896–897]
- Wu SH, Yin YH, Zheng D, Yang QY, 2005. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 60(1): 3–11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 杨勤业, 2005. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报, 60(1): 3–11]
- Xu WX, Liu XD, 2007. Response of vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau to global warming. *Chinese Geographical Science*, 17: 151–159.
- Yamamura K, Yokozawa M, Nishimori M, Ueda Y, Yokosuka T, 2006. How to analyze long-term insect population dynamics under climate change: 50-year data of three insect pests in paddy fields. *Popul. Ecol.*, 48: 31–48.
- Zalom FG, Goodell PB, Wilson LT, Barnett WW, Bentley WJ, 1983. Degree-days: the calculation and use of heat units in pest management. *Univ. Calif. Div. Agric. Nat. Res. Leaflet*, 21373.
- Zhou NF, Qin NS, Tu QP, Li DL, 2005. Analyses on regional characteristics of temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years. *Plat. Meteorol.*, 24(3): 344–349. [周宁芳, 秦宁生, 屠其璞, 李栋梁, 2005. 近 50 年青藏高原地面气温变化的区域特征分析. 高原气象, 24(3): 344–349]

(责任编辑: 袁德成)